第40卷 第7期
2023年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

基于多模式的青藏高原前冬降水预测性能评估

申红艳[1]， 温婷婷[2]， 赵仙荣[3]， 冯晓莉[2]

（1. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室，陕西 西安 710014；2. 青海省气候中心，青海 西宁 810001；3. 陕西省大气探测技术保障中心，陕西 西安 710014）

摘 要：基于目前主流气候业务模式系统（BCC_CSM 1.1、ECMWF_System 5、NCEP_CFSv 2、TCC_MRI-CGCM 3），从确定性预报角度评估多种模式对青藏高原前冬降水的预测性能。结果表明：多模式均能体现出青藏高原前冬（11—12月）降水空间分布型，但对降水量级存在普遍高估的现象，其中，来自BCC的模式能反映出降水全区一致型和南北反向型主模态的时空演变特征，EC模式高估第一模态的主导作用。多模式对降水历史回报以正技巧为主，BCC模式的预报技巧最优，TCC仅对青藏高原北部预测较好。从可预报性来源的角度分析发现，赤道中东太平洋海温指数（Niño 3.4）和印度洋偶极子（IOD）正位相对提升模式预测技巧具有很好的指示性；BCC模式能预测出2018年高原前冬降水异常趋势，在于其对影响青藏高原降水异常的关键环流型具有一定预测能力。

关键词：降水；预测性能；模式评估；青藏高原

青藏高原被称作地球“第三极”和“亚洲水塔”[1]，受东亚季风、南亚季风[2]和西风带[3]的共同影响。高原冬季降水占年总量比例虽小，但极端性强且年际和季内变率大，在高原东麓及巴彦喀拉山南缘易出现严重雪灾[4]，如2018年冬季，青藏高原降雪量级大且持续时间长形成历史破纪录事件，遭遇近60 a来最严重雪灾，对高寒牧区畜牧业生产、交通运输带来很大影响。Zhou等[5]基于国际大气-海洋耦合模式第5阶段比较计划（CMIP5）预估了北半球未来降雪变化，结果表明2021—2050年和2070—2100年青藏高原日降雪量和强降雪事件频率将会增加，这对青藏高原地区未来雪灾防御提出新的挑战。

在天气尺度上，青藏高原东部冬春降雪的典型环流形势有北脊南槽型、乌山脊型、阶梯槽型等[6-7]。董文杰等[8]研究发现，造成青藏高原东部强降雪事件年际变化的主要原因是不稳定的波槽气流发展，与欧亚中高纬大型天气系统的活动和环流调整有关。Cuo等[9]将青藏高原北部冬季降雪变化归因于北大西洋涛动（NAO）、北极涛动（AO）、东亚西风急流（WJ）和El Niño-Southern Oscillation（ENSO）的共同影响。Gao等[10]研究指出，水汽通量中的动力分量对青藏高原冬季降雪发挥重要作用。Yuan等[11]研究指出印度洋偶极子（IOD）和厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）对青藏高原初冬积雪具有重要指示意义，Jiang等[12]研究表明IOD异常可引起印度洋西部对流活动并通过激发波列在青藏高原中部产生气旋性环流异常，有利于引导来自热带的水汽输送至高原中部引起积雪异常。Shen等[13]进一步验证IOD和ENSO对青藏高原前冬降雪异常的独立和共同作用，IOD和ENSO正位相时通过影响欧亚南部型遥相关型（SEA）波列，在高原上空出现异常上升运动且对流层中低层气温下降，为高原前冬降雪异常提供动力和热力条件。关于青藏高原冬季降水（雪）方面的研究，多侧重针对其极端特征变化及机理归因研究，但模式评估或数值模拟方面的工作相对较少。

近年来伴随气候数值模式的快速发展，模式已成为短期气候预测的有力工具之一。由中国发展的BCC模式对雪盖参数化等物理过程进行改进[14]，发展了第二代全球大气环流谱模式BCC_AGCM

收稿日期：2023-03-08； **修订日期**：2023-05-17
基金项目：国家自然基金项目（42065003）和青海省科技厅基础研究计划（2021-ZJ-757）共同资助
作者简介：申红艳（1979-），女，高级工程师，主要研究方向为气候与气候变化. E-mail: ishyshen@163.com
通讯作者：温婷婷. E-mail: 66076253@qq.com

2.0.1，在极端气温事件[15]、夏季雨带的年代际变化[16]、季节大气环流异常[17]等方面在中国区域展现出较好的预测性能，基于BCC_AGCM 2.2所建立的第二代月动力延伸期预测模式业务系统（DERF 2.0）对我国月尺度气温和降水的预测能力也明显提升[18]。在此基础上，国家气候中心进一步建立了包含全球碳循环和动态植被在内的海-陆-气-冰多圈层耦合的气候系统模式BCC_CSM 1.1，并基于全球110 km中等分辨率的BCC_CSM 1.1 m研发了第二代短期气候预测模式系统[19]，有效提升了东亚夏季风环流和降水预报的能力[20-22]。欧洲中期天气预报中心（ECMWF）在上世纪90年代初就建立了基于持续性海温异常强迫、高分辨率的气候预测系统，并于2004年发展集合成员多达51个的海气耦合集合预测系统。美国气候预测中心（NCEP/CPC）2011年推出第二代模式系统CFSv2，包含了新的云-气溶胶-辐射、陆面、海洋和海冰过程以及新的海陆气资料同化系统，是大气-海洋-陆面全耦合的系统，该模式对于ENSO年际变率有较好的模拟能力，对全球热带地区降水和表面气温的预测较上一版本有一定提升。日本气象厅（JMA）的MRI-CGCM模式，该模式由大气环流模式AGCM和海洋环流模式OGCM耦合而成。目前，基于模式针对北半球中高纬地区研究仍然较少，尤其对青藏高原的模拟性能如何尚未可知。

青藏高原气候严寒，进入11月地表气温已普遍降至零度以下，以固态降水（降雪）为主，极易出现极端强降雪事件且降雪不易融化造成雪灾，因而，前冬是高原雪灾高发期，因此，本文中青藏高原前冬是指11—12月这个时段，利用目前国内外主流的季节气候预测模式的历史回报试验数据，探究多模式能否模拟再现青藏高原前冬降水的主要时空变化特征，通过误差指标评估模式间的预测性能优劣，并从可预报性角度分析预报技巧来源，以期为高原地区冬季气候预测及雪灾防御提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

采用目前国内外主流的气候模式，包括来自国家气候中心（BCC）实时发布的季节气候预测模式（CSM 1.1），欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的海气耦合模式集合预测系统（System 5），美国国家环境预报中心（NCEP）发展的第二代全耦合系统（CFSv 2），以及东京气候中心（TCC）推出的大气-海洋环流耦合模式（MRI-CGCM 3）（表1）。统一选取各模式历年9月起报的青藏高原前冬回报试验数据进行检验，基于模式原始输出场，利用各模式历史回报时段的平均值计算模式预报的环流异常场。模式场多年平均值计算时段：1983—2010年（BCC）、1981—2010年（ECMWF）、1982—2010年（NCEP）和1981—2010年（TCC）。通过双线性插值方法将模式资料从格点插值到站点，同实况场进行对比。验证资料包括中国气象局国家信息中心的逐月降水站点观测数据，从中提取青藏高原观测序列连续的86个站点资料（图1），由于青藏高原西部观测站网稀疏，文中主要讨论其中东部的检验结果，资料时段为1961—2020年；再分析资料来自美国国家环境预报中心和大气研究中心（National Centers for Enviromental Prediction/National Center for Atmospheric Research，NCEP/NCAR）的逐月位势高度场和海表温度场，水平分辨率为2.5°×2.5°，时间范围自1979—2020年。前冬降水为11—12月的累计降水量，观测资料气候态为1981—2010年的平均值。

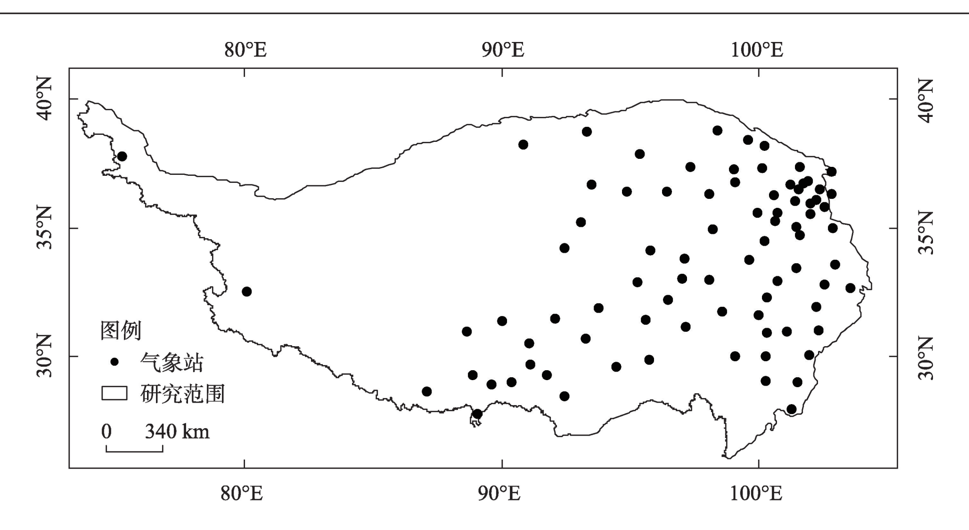
1.2 研究方法

1.2.1 检验评估方法 采用距平相关系数（Anomaly Correlation Coefficient，ACC）、时间相关系数（Temporal Correlation Coefficient，TCC）和均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）[23]三项评估指标，从确定性预报的角度客观定量评估模式的预测性能。

表1 气候模式信息列表

Tab. 1 The information list of climate models

数据来源	名称	预报时效	模式分辨率/(°)	历史回报时段
国家气候中心（BCC）	CSM 1.1	11个月	1×1	1983—2010年
欧洲中期天气预报中心（ECMWF）	System 5	7个月	1×1	1981—2010年
美国国家环境预报中心（NCEP）	CFSv 2	9个月	1×1	1982—2010年
东京气候中心（TCC）	MRI-CGCM 3	7个月	1×1	1979—2010年



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2016)2923号，对底图边界无修改。

图1　青藏高原气象观测站点分布

Fig. 1　The meteorological stations distribution on the Tibetan Plateau

距平相关系数（ACC），用来反映预测场同实况场的空间相似程度，计算公式如下：

$$\mathrm{ACC}_j=\frac{\sum_{i=1}^{m}(\Delta x_{i,j}-\overline{\Delta x_j})\times(\Delta f_{i,j}-\overline{\Delta f_j})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(\Delta x_{i,j}-\overline{\Delta x_j})^2\times\sum_{i=1}^{m}(\Delta f_{i,j}-\overline{\Delta f_j})^2}} \quad (1)$$

时间相关系数（TCC）能够表征模式在每个格点的预报能力，可得到预报技巧空间分布，计算公式如下：

$$\mathrm{TCC}_i=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{i,j}-\overline{x_i})\times(f_{i,j}-\overline{f_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{i,j}-\overline{x_i})^2\times\sum_{i=1}^{n}(f_{i,j}-\overline{\Delta f_i})^2}} \quad (2)$$

ACC和TCC的取值范围均在−1~1，越接近于1则表示预报技巧越高。

为比较多套资料的效果，文中采用公式（3）计算模式场相对实况观测场的均方根误差（RMSE），计算如下：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2} \quad (3)$$

式中：x 和 y 为参与对比的两套资料。

1.2.3　气候指数计算方法　欧亚型（Eurasian pattern，EU）遥相关型指数，反映西欧上空位势高度与西伯利亚之间反相关，而与中国东北和日本一带则为正相关[23]。EU指数计算如下：

$$\mathrm{EU}=-\frac{1}{4}Z(55^\circ\mathrm{N},20^\circ\mathrm{E})+\frac{1}{2}Z(55^\circ\mathrm{N},75^\circ\mathrm{E})-\frac{1}{4}Z(40^\circ\mathrm{N},145^\circ\mathrm{E}) \quad (4)$$

式中：Z 为500 hPa位势高度场。

1.2.2　统计方法　文中所用统计方法包括趋势分析、相关分析和经验正交函数分解（EOF）法[24]。

2　结果与分析

2.1　多模式的历史回报能力对比分析

青藏高原前冬降水量自西北向东南递增（图2a），其西北部大范围地区前冬降水量不足3 mm，东南部为高值区可达10 mm以上，是冬季雪灾比较频发的地区。青藏高原前冬降水均方差同样也呈现出西北少−东南多的分布格局（图2b），在降水量级大的区域对应均方差偏大，相反量级小的区域均方差则较小，高值区位于横断山脉东西两侧，表明上述地区的前冬降水年际变率较大，这一特征从前冬降水历年变化（图略）中也可得以印证，尤其自上世纪70年代中期至90年代末，年际振荡频繁且幅度较大。

在此根据BCC_CSM 1.1、EC_System 5、NCEP_CFSV 2、TCC_ MRI-CGCM 3模式（分别简称BCC、EC、NCEP、TCC）的历史回报结果，分析模式对青藏高原前冬降水基本特征的刻画能力，包括气候态和空间变率主模态特征。图3为青藏高原前冬多年平均降水量的历史回报结果，同图2的降水实况相比，四个模式均能预测出青藏高原前冬降水西北少−东南多的分布格局，但对降水量级有所高估，尤其在降水量级较大的东南部，模式和实况的偏差均较大，来自BCC和TCC的模式预测结果均为正偏差，其中，BCC在横断山脉以西、昆仑山脉−柴达木盆地

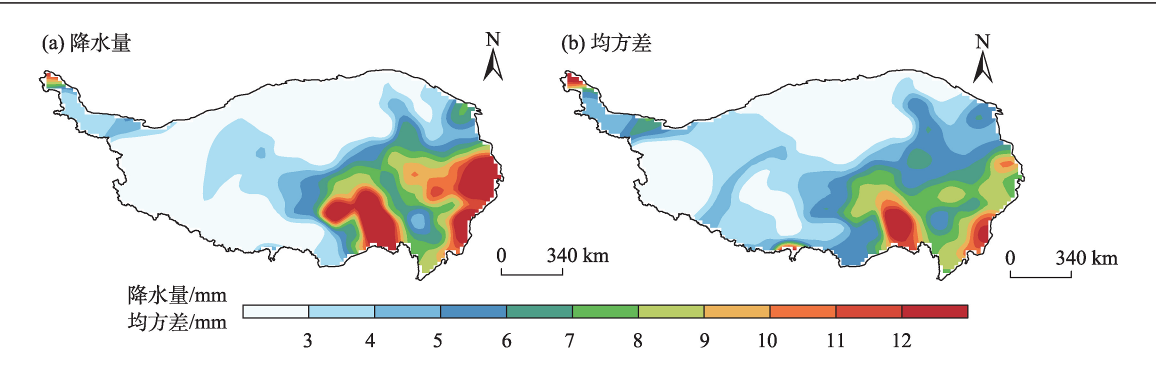


图2 青藏高原前冬气候态平均降水量(a)和均方差(b)空间分布

Fig. 2 The distribution of climate mean precipitation (a) and mean square deviation (b) in early winter over the Tibetan Plateau

(a) BCC_CSM 1.1
(b) BCC_CSM 1.1
(c) EC_System 5
(d) EC_System 5
(e) NCEP_CFSv 2
(f) NCEP_CFSv 2
(g) TCC_MRI-CGCM 3
(h) TCC_MRI-CGCM 3
N
0 340 km
降水量/mm
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
降水偏差/mm
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50

图3 基于多模式回报的青藏高原前冬气候态降水量(左)及其差值场(右)

Fig. 3 The distribution of climate mean precipitation (left) and its deviation (right) based on models hindcasting in early winter over the Tibetan Plateau

一带的偏差较大，TCC在横断山脉西侧的偏差较大，EC和NCEP两种模式在高原大部分区域高估实际观测值，但分别存在小范围的低估区，这两个模式和实况的偏差整体较小。

降水主模态的模拟刻画能力是反映模式预测性能的重要方面，这里对青藏高原前冬降水实况进行EOF分解（图4），前三模态累积方差贡献率为51.4%（表2），经North检验[25]各模态间相互独立，可代表青藏高原前冬降水的主要特征，第一模态方差贡献率为32.7%，在空间上几乎呈全区一致型分布，仅高原东南侧的横断山脉出现小范围反相荷载区；第二模态为南北反向型，祁连山区—柴达木盆地同青藏高原其他区域呈反相分布特征；第三模态表现为三极型分布，在青藏高原东部地区自北向南呈"正-负-正"型分布，位于青藏高原腹地的三江源区（黄河、长江、澜沧江）同其他区域呈反相分布。根据四种模式历年9月起报的前冬降水，同样通过EOF分解提取主模态，发现模式可以体现出前两个主模态空间分布型（图4），对于第一模态，TCC、EC和BCC三种模式同实况的第一载荷向量场空间相关系数显著通过0.10显著性检验，模式方差贡献率在30%左右，其中，BCC最接近实况（33.7%），EC最高（42.9%），明显高估第一模态的主导作用；除EC外，其余模式和实况场的第一模态时间系数相关性

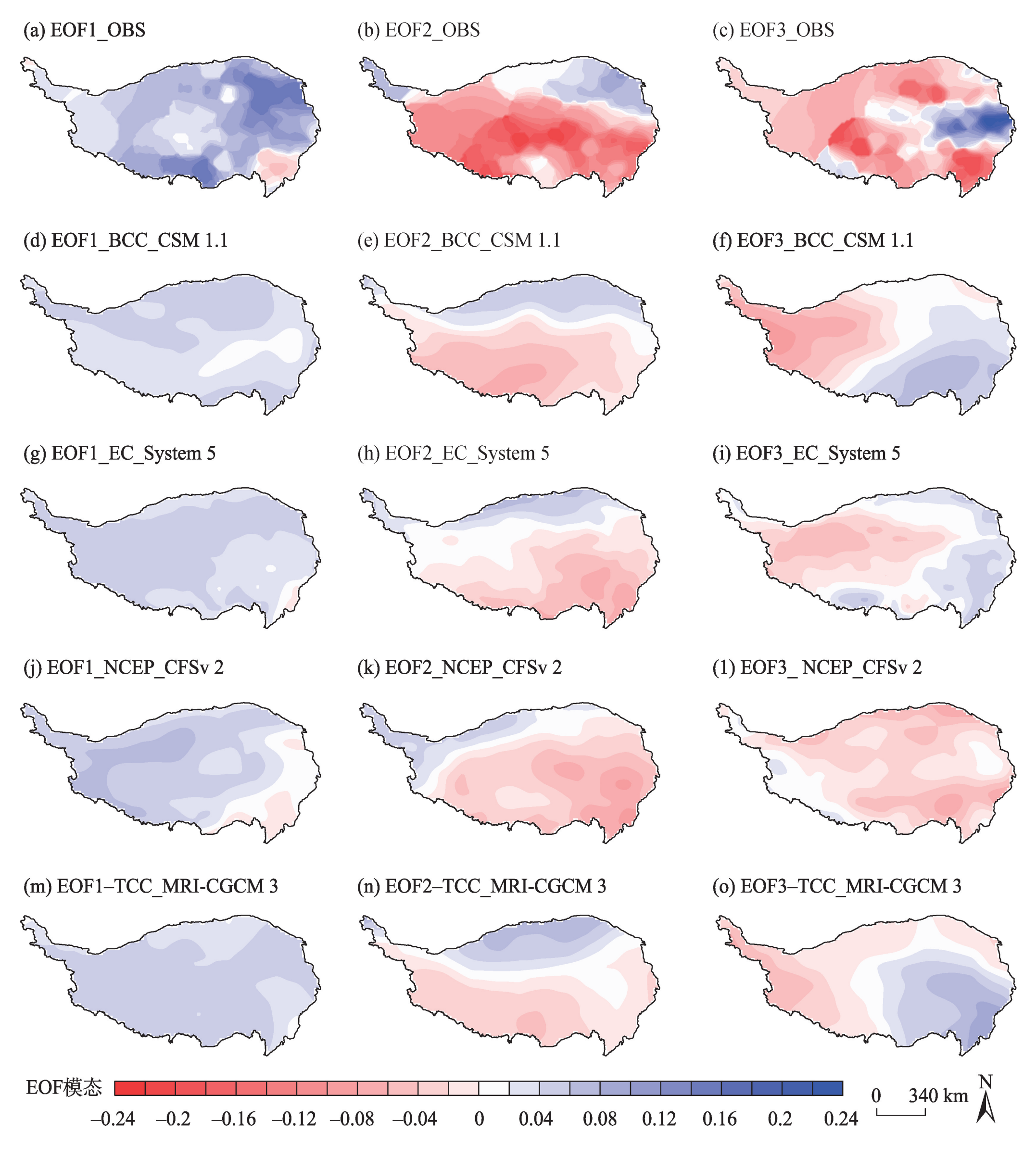


图4　基于观测和多模式回报的青藏高原前冬降水EOF前三模态空间型

Fig. 4　The first three EOF modes of TP precipitation during early winter over the Tibetan Plateau based on observation and multi-model hindcasting

表2 观测和模式回报的前三模态方差贡献率

Tab. 2 The variance contribution rates of the first three modes based on the observation and model hindcasting

名称	第一模态/%	第二模态/%	第三模态/%	累积方差贡献率/%
OBS	32.7	11.8	6.9	51.4
BCC_CSM 1.1	33.7	21.3	10.1	65.1
EC_System 5	42.9	15.9	8.4	67.2
NCEP_CFSV 2	28.1	14.4	9.2	51.7
TCC_MRI-CGCM 3	38.1	19.5	10.9	68.5

通过0.05显著性检验，BCC最高(0.409)，显著通过0.01信度水平检验，TCC次之，EC最低(表3)。各模式对第二模态(南北反向型)的空间描述能力最佳，空间相关系数显著通过0.05信度水平检验，其中BCC、EC和NCEP通过0.01的显著性检验，BCC最优，空间相关系数高达0.755。对于第三模态，模式的刻画能力明显减弱，三极型分布特征在模式中均未得到体现，模式在青藏高原西部的载荷向量同实况一致，但在其东部的模拟能力较弱。模式中第二和第三模态的时间系数相关性均较弱，表明各模式对这两类空间型年际变化特征的刻画能力较弱。

综上所述，BCC模式对青藏高原前冬降水主模态的模拟性能最优，较准确刻画出全区一致型和南北反向型的主模态特征，且时间系数的演变和实况也比较相符，因此，BCC能更好把握青藏高原前冬降水主模态的时空演变特征。TCC和EC模式对前两个主模态空间型的刻画均较好，但EC夸大了第一模态的方差贡献，CFS则对全区一致型和三极型分布具有一定的模拟能力。

2.2 历史回报技巧评估

RMSE是通过衡量模式预测值和观测值的偏差来反映模式性能的优劣，由多模式历史回报的均方根误差(RMSE)结果可知(图5)，在青藏高原南部RMSE值普遍高于北部，印证了上节得出的青藏高原北部的预测技巧高于南部，青藏高原南部边缘地带的RMSE异常偏大，对应降水量级较大的区域；与此同时，BCC相比其他模式的均方根误差偏高，尤其在青藏高原南部和西北部地区，这同图3中的结果相对应，TCC模式次之，EC模式最小；除BCC模式外，其余模式的RMSE量级和空间分布都比较类似。

由模式历史回报场同实况场的时间相关系数(TCC)分布可知(图6)，模式对青藏高原前冬降水预报以正技巧为主，其中，来自BCC模式的显著正相关区覆盖范围较大，表明该模式预报正技巧较高，已有研究表明BCC模式主要对ENSO的遥相关影响区域具有较高的预报能力[26]，青藏高原正好位于该遥相关沿南支路径所影响到的区域，有助于提升模式在该区域的预报技巧。EC在青藏高原中西部为显著正相关区，说明对这些区域具有较好的预测技巧，青藏高原东部的黄河源区和西南部出现负技巧。NCEP和EC的分布类似，正负技巧落区较一致，EC模式的显著相关区范围更大。来自TCC模式的显著正相关区位于青藏高原北部，高原南部则呈负相关，横断山脉附近为显著负相关区，这同EC模式正好相反，因而在实际应用中对于该区域两家模式可进行互补性参考。就时间相关系数这一评估标准而言，BCC模式的预报技巧最优，EC优于NECP，而TCC仅对高原北部具有一定的技巧。

印度洋和太平洋海温年际变率异常是气候预测的重要信号，ENSO事件是季节预测最重要的可预报性来源，已有研究表明，BCC二代模式对ENSO预报的相关技巧与一代模式相比有显著提升[26-27]。

表3 观测值与模式空间型及其时间系数的相关对照表

Tab. 3 The correlation coefficients between the observation and model hindcasting on patterns and time series

名称	第一模态	第二模态	第三模态	第一时间系数	第二时间系数	第三时间系数
BCC_CSM 1.1	0.359*	0.755***	0.002	0.409**	0.303	0.131
EC_System 5	0.382**	0.646***	0.106	0.279	−0.105	0.141
CFS_NCEP_CFSV 2	0.061	0.541***	0.391**	0.305*	−0.103	0.317*
TCC_TCC_MRI-CGCM 3	0.510***	0.443**	0.070	0.403**	0.088	0.013

注：*、**和***分别表示通过0.10、0.05和0.01信度水平检验。

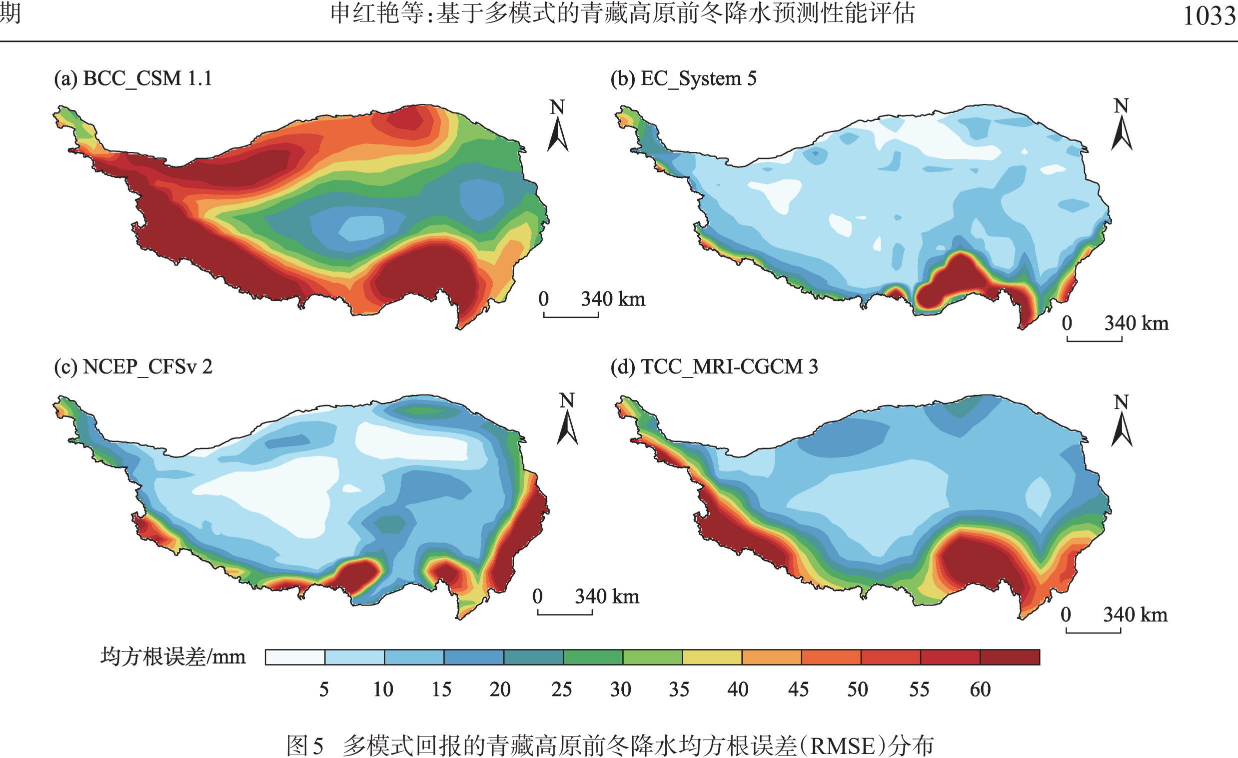
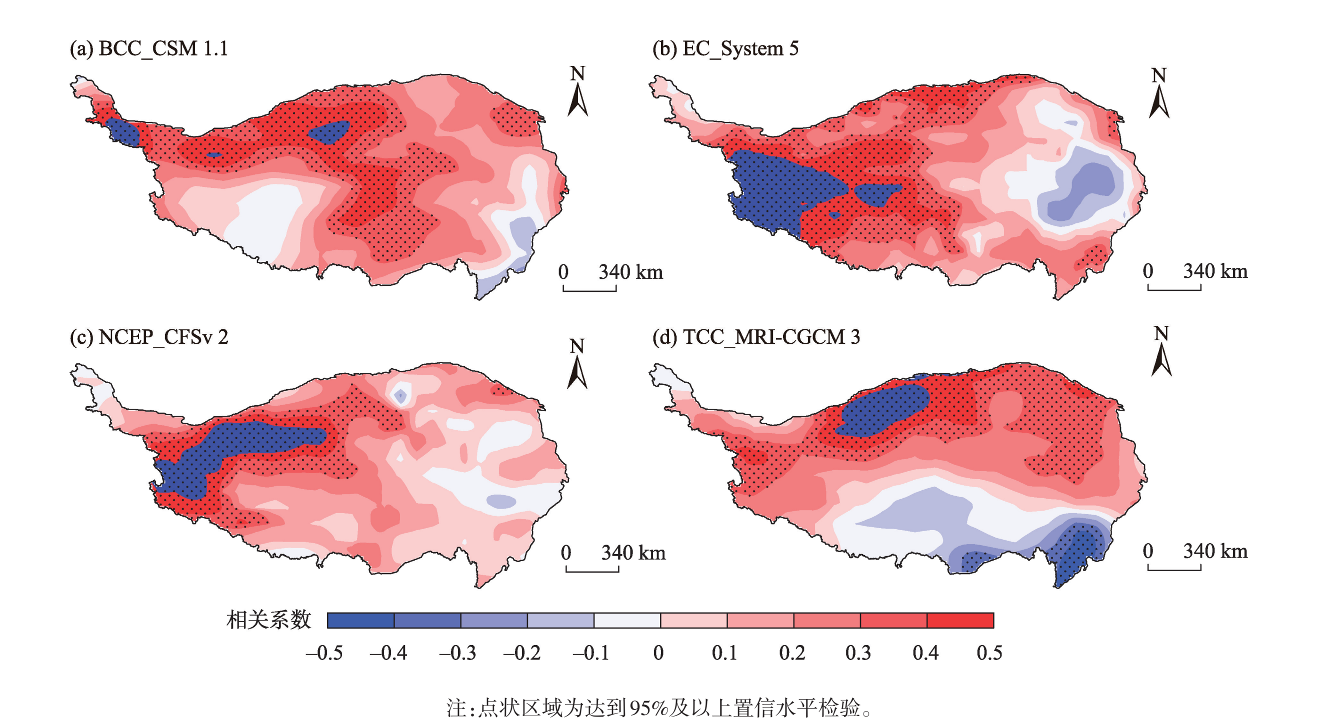


图5 多模式回报的青藏高原前冬降水均方根误差(RMSE)分布

Fig. 5 RMSE skill for precipitation during early winter over the Tibetan Plateau based on multi-model hindcasting



注:点状区域为达到95%及以上置信水平检验。

图6 多模式回报的青藏高原前冬降水时间相关系数(TCC)

Fig. 6 Temporal correlation coefficient (TCC) skill for precipitation during early winter over the Tibetan Plateau based on multi-model hindcasting

那么模式预测性能同海温异常背景是否存在关联?选用Niño 3.4海温指数和印度洋偶极子(IOD)指数分别代表太平洋和印度洋海温状况,由BCC和TCC模式预测的ACC分别同秋季(9—10月)Niño 3.4和IOD指数的散点关系图可以发现(图7),当Niño 3.4和IOD为正位相时,对应模式预测结果以正技巧为主,其中BCC模式表现最优,相反二者为负位相时,则模式出现正技巧和负技巧的概率相当,表明模式预测的不确定性增大,尤其当IOD为负位相时,TCC模式的ACC以负值为主,说明此时模

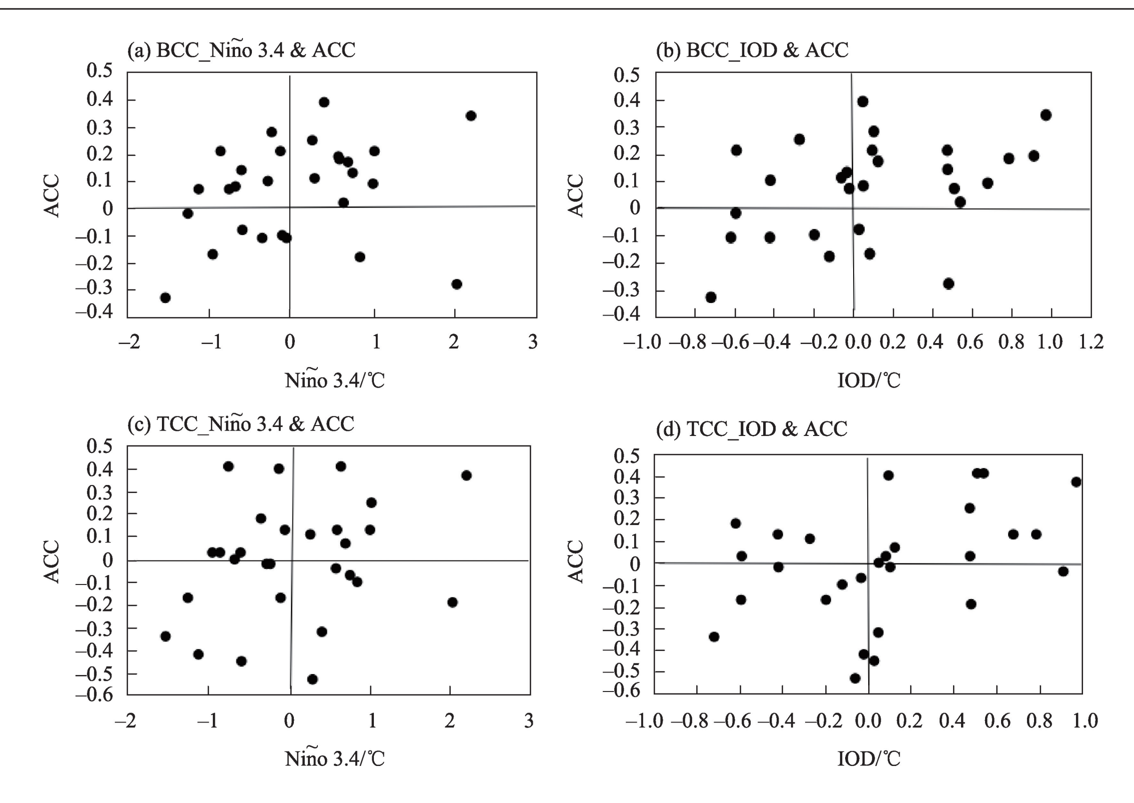


图7　BCC和TCC模式的距平相关系数(ACC)同Niño 3.4、IOD指数的散点关系

Fig. 7　Scatter plot of the Niño 3.4, IOD indices and ACC in early winter during 1961−2018 by BCC and TCC models

式已不具备预测能力,可见Niño 3.4和IOD的位相对BCC、TCC模式的预报技巧具有指示作用,二者正位相均有利于这两种模式呈现出正技巧,而负位相时预测不确定性增大,预测性能随之降低,且TCC模式更依赖于IOD位相变化,IOD负位相时该模式易出现负技巧。

2.3　历史典型年检验评估

青藏高原2018年前冬降水突破有历史记录以来的历史极值,造成严重雪灾,由2018年前冬降水量及其距平百分率可知(图8),降水高值区位于青藏高原东南部,且大部分地区降水较气候值偏多1倍以上,模式对如此典型的降水异常年的模拟能力如何?对2018年历史典型异常年,检验多模式对极端降水的预测效果,进而评估模式对极端性的预测能力。

从2018年10月模式起报的青藏高原前冬降水量及距平百分率分布可知(图9),BCC、EC和NCEP模式存在对青藏高原西北部降水一致高估、东南部低估现象,而TCC模式则对整个青藏高原地区高估,且在西南侧高估最明显。比较来看,BCC同实况最接近,偏差可控制在10%以内,对降水分布型及大值中心具有预测能力;TCC次之,在青藏高原西南侧偏差较大(高于20%),其余地区的偏差在10%左右;EC和NCEP同实测的偏差比较明显。根据降

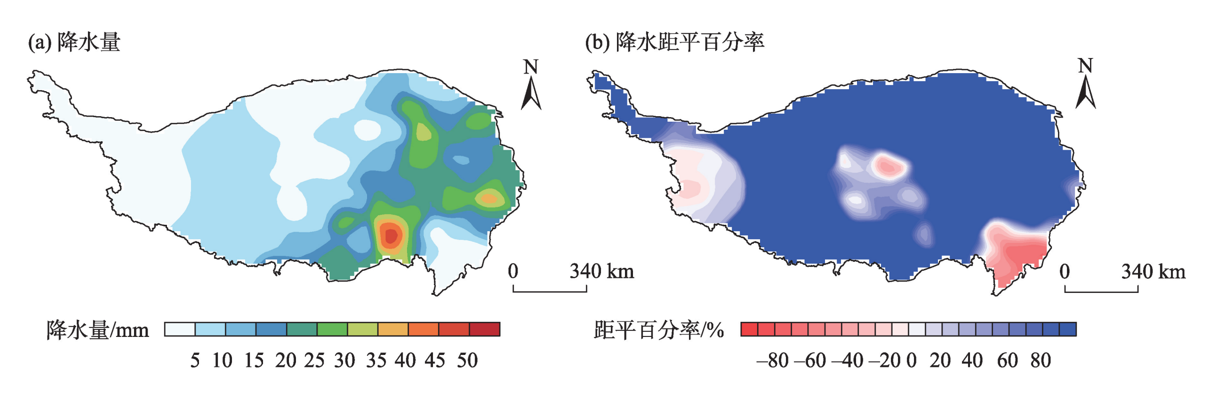


图8　2018年青藏高原前冬降水量和降水距平百分率

Fig. 8　The precipitation and its anomalous percentage during early winter 2018 over the Tibetan Plateau

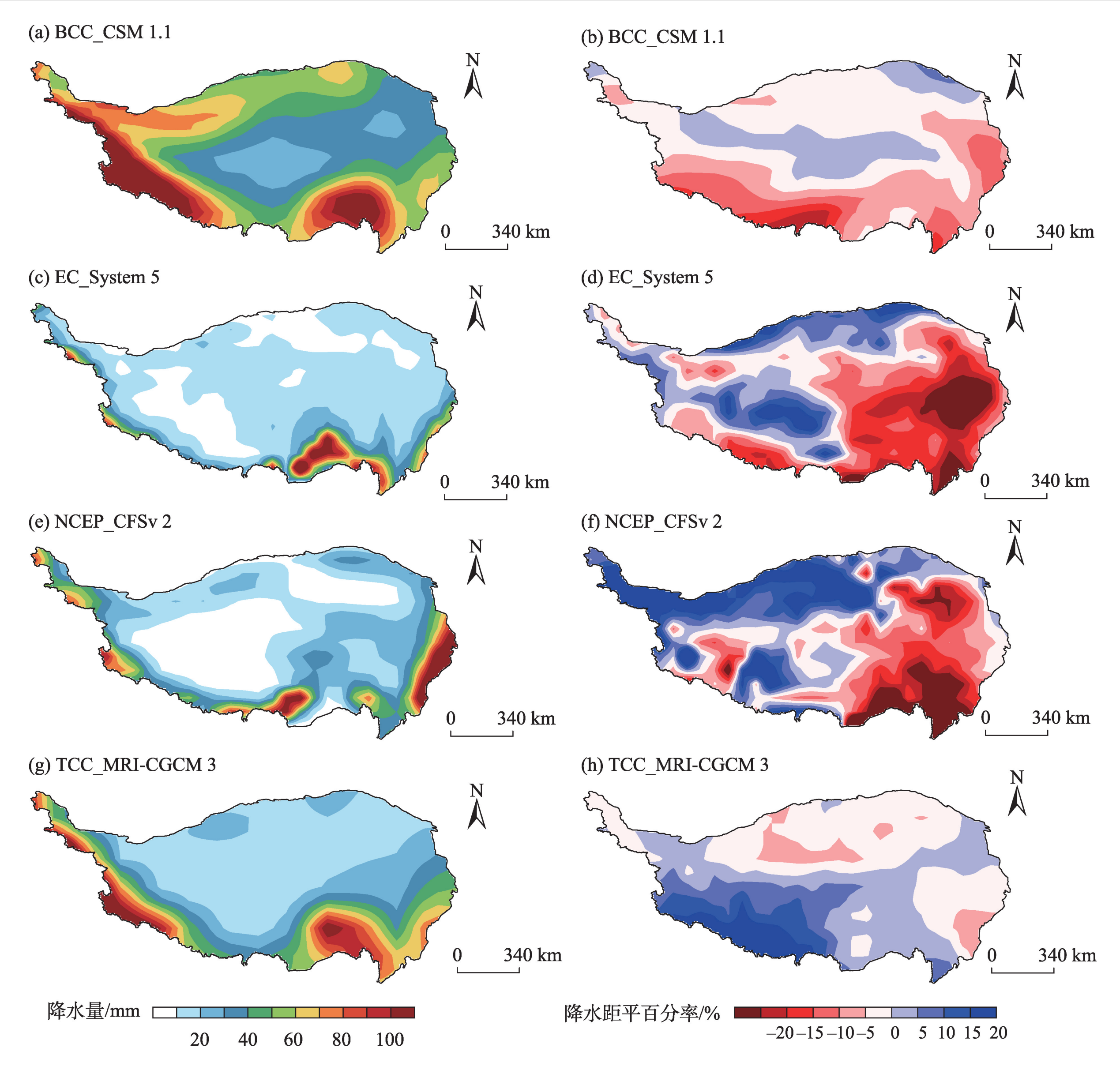


图9　多模式预测的2018年前冬降水量(左)及其降水距平百分率(右)分布

Fig. 9　The precipitation (left) and its anomalous percentage (right) in early winter 2018 based on multi-model prediction

水距平百分率分布，BCC模式预测结果除在青藏高原东侧和南侧与实况相反，其余大部分地区同实况场相一致，可预测出降水异常偏多，但其异常程度同实况存在差异；EC和NCEP仅在青藏高原西北部预测出偏多的特征，而在2018年雪灾异常严重的高原东南部出现预报失误；TCC模式结果显示在青藏高原大部地区前冬降水偏多为主，但异常量级远不及实况。综合而言，BCC和TCC模式可较好预测出2018年青藏高原降水偏多的趋势，但其异常量级和落区同实况存在一定差异，EC和NCEP模式对青藏高原西北部偏多趋势预测准确，但在其东南部出现明显误判。

环流是直接影响降水异常的主要因素，2018年前冬500 hPa位势高度距平场显示(图10a)，自北大西洋北部-欧洲西部-亚洲区域呈“负-正-负”波列式分布，欧洲高压脊明显偏强，在斯堪的纳维亚上空出现明显正高度异常中心，同时在东北亚地区存在一个正异常中心，有利于鄂霍茨克海阻塞高压的发展，而极地—西伯利亚为负异常并向南延伸至我国西南地区，东亚大槽偏强，青藏高原位于负高度距平控制区，这种水平环流异常特征正好对应欧亚遥相关型(EU)的负位相特征[28]。遥相关指数计算结果显示(图10b)，2018年前冬EU指数为-129.4，为近58 a来历史第三低值，仅次于2011年(151.9)和1968年

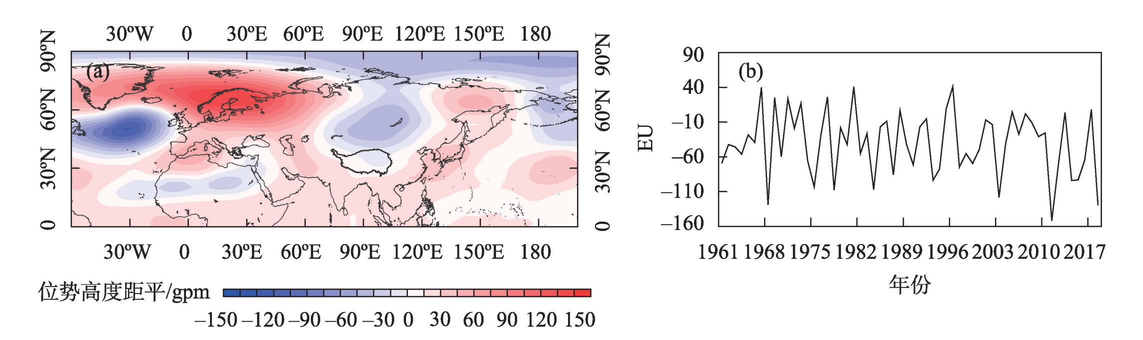


图10 基于NCEP再分析资料的2018年前冬500 hPa位势高度距平场(a)和前冬欧亚遥相关型指数(EU)的演变曲线(b)

Fig. 10 The anomalous field of 500 hPa geopotential height in early winter 2018 (a) and the temporal variation of EU index based on NCEP dataset (b)

(a) BCC_CSM 1.1 (b) BCC_CSM 1.1

(c) EC_System 5 (d) EC_System 5

(e) NCEP_CFSv 2 (f) NCEP_CFSv 2

(g) TCC_MRI-CGCM 3 (h) TCC_MRI-CGCM 3

位势高度距平/gpm 位势高度偏差/gpm

图11 多模式预测的2018年前冬500 hPa位势高度距平场

Fig. 11 The anomalous field of 500 hPa geopotential height in early winter 2018 based on multi-model prediction

(-129.1),可见2018年前冬EU型遥相关负位相特征异常显著。分析不同模式对2018年前冬环流场的预测能力,在此利用NCEP再分析资料进行对比,BCC模式可预测出中纬度的波列结构(图11),从北大西洋至东亚地区的"负-正-负"波列式分布,大西洋东北部为负异常、斯堪的纳维亚半岛—东欧平原的正异常、贝加尔湖及其以南的负异常,高技巧区与欧亚遥相关型(EU)波列分布类似。BCC模式预测的北半球高度距平场同实况场相似系数为0.533,显著通过0.01信度水平检验,同实况较吻合,对提升降水预测性能具有直接作用,但对巴尔喀什湖—贝加尔湖地区的预测技巧为负,对冬季高原高度场异常会产生直接影响,从而削弱对降水的预报性能,而其他模式对中纬度的波列也有所体现,但强度和中心位置存在明显差异,在该区域的预测性能也为负或明显减弱,进一步说明改善模式对冬季中纬度地区的预测性能至关重要,同时也为重点改进区域提供一定思路。

2018年海温异常监测显示(图12),赤道中东太平洋海温异常偏暖,白令海附近为显著正异常,北大西洋地区为北大西洋三极子(NAT)正位相特征,北印度洋一致偏暖,南印度洋具有西正东负型分布特征;多模式较一致地预测出赤道太平洋地区海温正异常的特征(图13),同时对于北大西洋海温三极型(NAT)正位相结构也均有体现,尤其是BCC和EC模式对关键区海温的模拟同实况较接近,以BCC模式表现最突出,表现在对南印度洋偶极型海温、北大西洋海温、ENSO暖位相特征均和实况最接近,综合上述分析结果,BCC模式对2018年青藏高原前冬降水和中高纬波列结构的预测技巧均比较高,由此推测模式可通过提高对关键区海温的预报技巧并准确把握海温对热带以外地区的遥相关影响,从而提升整体预测性能。

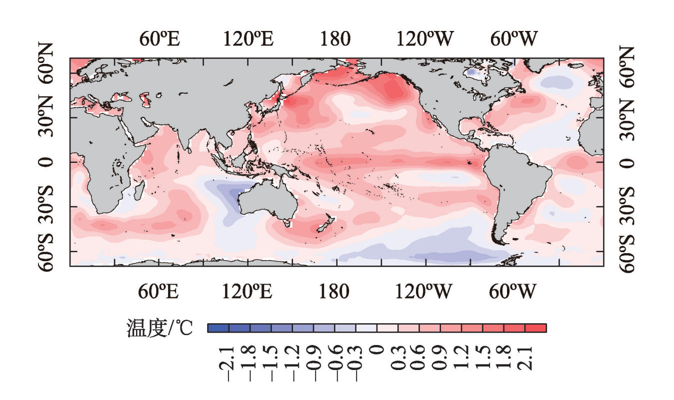


图12　2018年前冬海表温度距平场

Fig. 12　The SSTA in early winter 2018

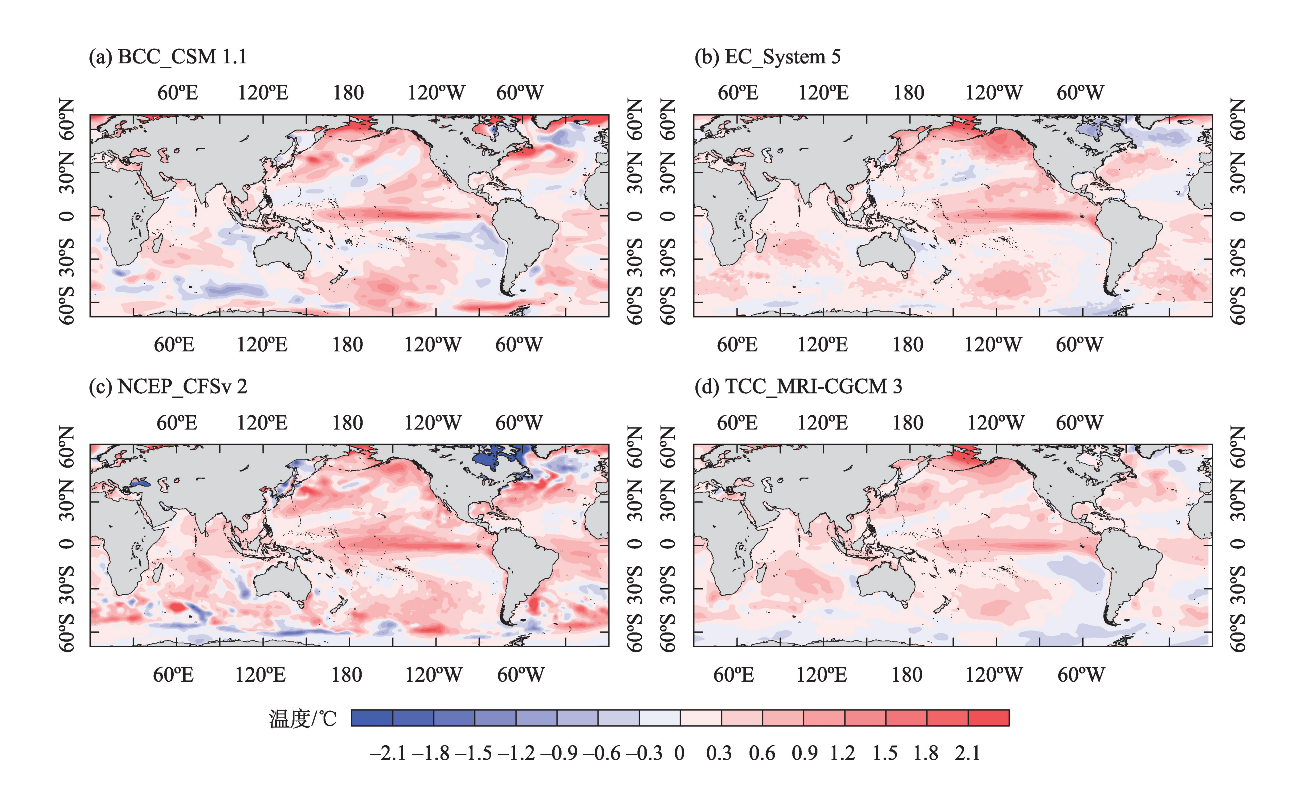


图13　2018年前冬海温预报场

Fig. 13　The SSTA prediction in early winter 2018 from models

3 结 论

采用国内外主流推广的4种业务模式，评估多模式对青藏高原前冬降水变化特征及其异常的预测性能。主要结论如下：

（1）多模式能体现出降水西北多-东南少的整体分布格局，但一致高估了降水量级；多模式对全区一致型降水主模态的模拟能力较好，来自BCC的模式可较好模拟出降水主模态的时空变化特征。

（2）多模式对低纬热带环流的预报技巧一致较好，而在中纬度地区，各模式的预报技巧较低，以负技巧为主，夏秋季出现ENSO或印度洋海温正位相时模式的预报技巧会显著提高，且预报技巧对IOD指数的依赖性更高，初秋IOD正异常有利于提升BCC和TCC模式的预测性能。

（3）对于2018年历史典型异常年，BCC模式预测结果更接近实况，偏差可控制在10%以内，是由于BCC模式对2018年中高纬波列结构的预测技巧较高，对关键区海温的预测同实况较接近，由此推测模式是通过提高对关键区海温的预报技巧并准确把握海温对热带外地区的遥相关影响，从而提升整体预测性能。

参考文献(References)：

[1] 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 756-772. [Xu Xiangde, Chen Lianshou. Advances of the study on Tibetan Plateau experiment of atmospheric sciences[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 756-772.]

[2] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C7): 14451-14510.

[3] Schiemann R, Lüthi D, Schär C. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region[J]. Journal of Climate, 2009, 22(11): 2940-2957.

[4] 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏. 中国降雪气候学特征[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1176-1185. [Liu Yulian, Ren Guoyu, Yu Hongmin. Climatology of snow in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(10): 1176-1185.]

[5] Zhou B, Wang Z, Shi Y. Possible role of Hadley circulation strengthening in interdecadal intensifcation of snowfalls over northeastern China under climate change[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(16): 265-283.

[6] 梁潇云, 钱正安, 李万元. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析[J]. 高原气象, 2002, 21(4): 359-367. [Liang Xiaoyun, Qian Zheng'an, Li Wanyuan. Analyses on circulation patterns and water vapor fields of snow disaster weather in Eastern pasture areas of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(4): 359-367.]

[7] 韩进军, 王建萍, 陈亮, 等. 影响柴达木盆地降水量变化的主要天气动力因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 314-324. [Han Jinjun, Wang Jianping, Chen Liang, et al. The main weather dynamic factors affecting precipitation change in the Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 314-324.]

[8] 董文杰, 韦志刚, 范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 402-406. [Dong Wenjie, Wei Zhigang, Fan Lijun. Climatic character analyses of snow disasters in east Qinghai-Xizang plateau livestock farm[J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(4): 402-406.]

[9] Cuo L, Zhang Y, Wang Q, et al. Climate change on the northern Tibetan Plateau during 1957-2009: Spatial patterns and possible mechanisms[J]. Journal of Climate, 2013, 26(1): 85-109.

[10] Gao Y, Chen Y, Lü S. Numerical simulation of the critical scale of oasis maintenance and development in the arid regions of Northwest China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 21(1): 113-124.

[11] Yuan C, Tozuka T, Miyasaka T, et al. Respective influences of IOD and ENSO on the Tibetan Plateau snow cover in early winter[J]. Climate Dynamics, 2009, 33(4): 509-520.

[12] Jiang X, Zhang T, Tam C Y, et al. Impacts of ENSO and IOD on snow depth over the Tibetan Plateau: Roles of convections over the western North Pacific and Indian Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(22): 11961-11975.

[13] Shen Hongyan, Gong Zhiqiang, Feng Guolin, et al. Causes of the extreme snowfall anomaly over the Northeast Tibetan Plateau in early winter 2018[J]. Climate Dynamics, 2021, 56: 1767-1782.

[14] Wu Z, Li J, Jiang Z, et al. Modulation of the Tibetan Plateau snow cover on the ENSO teleconnections: From the East Asian summer monsoon perspective[J]. Journal of Climate, 2012, 25(7): 2481-2489.

[15] Dong M, Wu T W, Wang Z Z, et al. A simulation study on the extreme temperature events of the 20th century by using the BCC_AGCM[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(4): 489-507.

[16] Chen G, Huang R. Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in Northwest China[J]. Journal of Climate, 2012, 25(22): 7834-7851.

[17] 朱春子, 李清泉, 王兰宁, 等. 基于T106L26全球大气环流模式的夏季集合预报[J]. 大气科学学报, 2013, 36(2): 192-201. [Zhu Chunzi, Li Qingquan, Wang Lanning, et al. An ensemble forecast for summer with a global atmospheric general circulation model T106L26[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(2): 192-201.]

[18] 何慧根, 李巧萍, 吴统文, 等. 月动力延伸预测模式业务系统DERF 2.0对中国气温和降水的预测性能评估[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 950-964. [He Huigen, Li Qiaoping, Wu Tongwen, et al. Temperature and precipitation evaluation of monthly dynamic extended range forecast operational system DERF 2.0 in China[J]. Chinese

Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 950-964.]

[19] 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展[J]. 应用气象学报, 2012, 24(5): 533-543. [Wu Tongwen, Song Lianchun, Liu Xiangwen, et al. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of china national climate center[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 24(5): 533-543.]

[20] 吴捷, 任宏利, 张帅. BCC二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析[J]. 大气科学, 2017, 41(6): 16-29. [Wu Jie, Ren Hongli, Zhang Shuai, et al. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(6): 16-29.]

[21] 顾伯辉, 郑志海, 封国林, 等. 季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力及其对热带海洋的响应分析[J]. 大气科学, 2017, 41 (1): 91-105. [Gu Bohui, Zheng Zhihai, Feng Guolin, et al. The capacity of seasonal forecast models for the forecast of the East Asian summer circulation and its response to tropical SST anomaly[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(1): 91-105.]

[22] 郭渠, 刘向文, 吴统文, 等. 基于BCC_CSM模式的中国东部夏季降水预测检验及订正[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 71-90. [Guo Qu, Liu Xiangwen, Wu Tongwen, et al. Verification and correction of East China summer rainfall prediction based on BCC_CSM[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(1): 71-90.]

[23] 孙照渤. 短期气候预测基础[M]. 北京: 气象出版社, 2010. [Sun Zhaobo. Elements of Short Period Climate Predictions[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010.]

[24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Statistical Diagnosis and Prediction Technology of Modern Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]

[25] North Gerald R, Bell Thomas L, Cahalan Robert F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110: 699-706.

[26] 任宏利, 刘颖, 左金清, 等. 国家气候中心新一代ENSO预测系统及其对2014/2016年超强厄尔尼诺事件的预测[J]. 气象, 2016, 42(5): 521-531. [Ren Hongli, Liu Ying, Zuo Jinqing, et al. The new generation of ENSO prediction system in Beijing Climate center and its predictions for the 2014/2016 super El Niño event [J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(5): 521-531.]

[27] Shen Hongyan, Gong Zhiqiang, Liu Boqi, et al. Remote effects of IOD and ENSO on motivating the atmospheric pattern favorable for snowfall over the Tibetan Plateau in early winter[J]. Frontiers in Climate, 2021, 3(6): 1-13.

[28] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern Hemisphere winter[J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(4): 784-812.

Evaluation of multi-model precipitation simulation over the Tibetan Plateau in early winter

SHEN Hongyan[1], WEN Tingting[2], ZHAO Xianrong[3], FENG Xiaoli[2]

(1. Shaanxi Meteorological Bureau, Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710014, Shaanxi, China; 2. Qinghai Climate Center, Xining 810001, Qinghai, China; 3. Shanxi Province Atmospheric Observation and Technical Support Center, Xi'an 710014, Shaanxi, China)

Abstract: The prediction performance of four seasonal prediction model systems (BCC_CSM 1.1, ECMWF_System 5, CFSv 2, and TCC_MRI-CGCM 3) was evaluated from a deterministic perspective. Focusing on the spatial distribution and temporal variation of precipitation climatology in early winter, BCC_CSM 1.1 exhibited the best prediction performance among the models. Additionally, TCC_MRI-CGCM 3 performed well in capturing the interannual variability of precipitation, followed by BCC_CSM 1.1. All models effectively simulated regional-uniform precipitation, with BCC_CSM 1.1 exhibiting the highest time correlation coefficient and TCC_MRI- CGCM 3 showing the highest pattern correlation coefficient. Although all models could reproduce the north-south reverse mode, BCC_CSM 1.1 outperformed the other models in terms of reproducing the spatial pattern and interannual variation, given the model's strong prediction capability for the Eurasian (EU) teleconnection pattern and western Pacific subtropical high, as well as accurate simulations of the physical processes of El Niño- Southern Oscillation (ENSO) and Indian Ocean dipole (IOD) that impact early winter Tibetan Plateau precipitation.

Keywords: precipitation; prediction ability; model assessment; Tibetan Plateau